

УДК 622.411.33:622.831

Г.Г. Каркашадзе, А.М-Б. Хаутиев**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕГАЗАЦИИ
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ЧЕРЕЗ СКВАЖИНЫ
С УЧЕТОМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ***

Представлены исследования процесса дегазации угольного пласта через скважины, пробуренные из подземных горных выработок. Аналитическая модель включает систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих массоперенос метана в угольном пласте и вмещающих породах на основе закона Дарси и уравнения Ленгмюра. Геомеханическая модель учитывает напряженно-деформированное состояние угольного и породного массива с учетом диаметра скважин и под действием горного давления. Связь между газопроницаемостью угольного пласта и средним горным давлением устанавливается экспериментальной экспоненциальной зависимостью. Выполнено компьютерное моделирование процесса дегазации средствами "COMSOL Multyphysics". Построены графические зависимости, отражающие напряженное состояние вокруг дегазационной скважины, распределение величины давления газа в угольном пласте и дебит метана в течение времени. Установлено, что фактор концентрации напряжений вокруг скважины приводит к повышению проницаемости и увеличению притоков метана, что представляет практический интерес при решении задач интенсификации дегазации угольного пласта. Результаты компьютерного моделирования соответствуют данным измерений фактических дебитов метана в шахтных условиях.

Ключевые слова: уголь, скважина, метан, уравнения массопереноса, геомеханика, моделирование, дегазация, горное давления, проницаемость, дебит метана.

При подземной отработке газоносных угольных пластов системой длинными выемочными столбами важной технологической операцией является пластовая дегазация, которую осуществляют с помощью скважин, пробуренных из оконтуривающих выработок [1]. Эффективность дегазации выемочного столба зависит от расстояния между дегазационными скважинами и длительности их функционирования. В тоже время дебиты метана из скважин зависят от газоносности, пластового давления метана и проницаемости углепородного массива. Большое влияние на проницаемость горных пород оказывает горное давление и вызванное им распределение напряжений вокруг дегазационных скважин.

На рис. 1 представлена принципиальная схема реализации способа пластовой дегазации [2]. Угольный пласт 1 окружен вмещающими породами 2. В пласте пробурены дегазационные скважины 3. Пласт оконтурен вентиляционным и откаточным штреками 4 и 5. Лава 6 движется по выемочному столбу в направлении к участкам дегазации. Дегазационные скважины подключены к магистральному газопроводу 7. Часть дегазационных скважин 3 оснащено измерительной аппаратурой 8, включающей манометр, расходомер и заслонку (на рисунке не показаны). Газ из магистрального газопровода 7 отбирают на дневную поверхность средствами газоотсоса 9.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобнауки РФ в рамках Субсидии 15.575.21 0015.

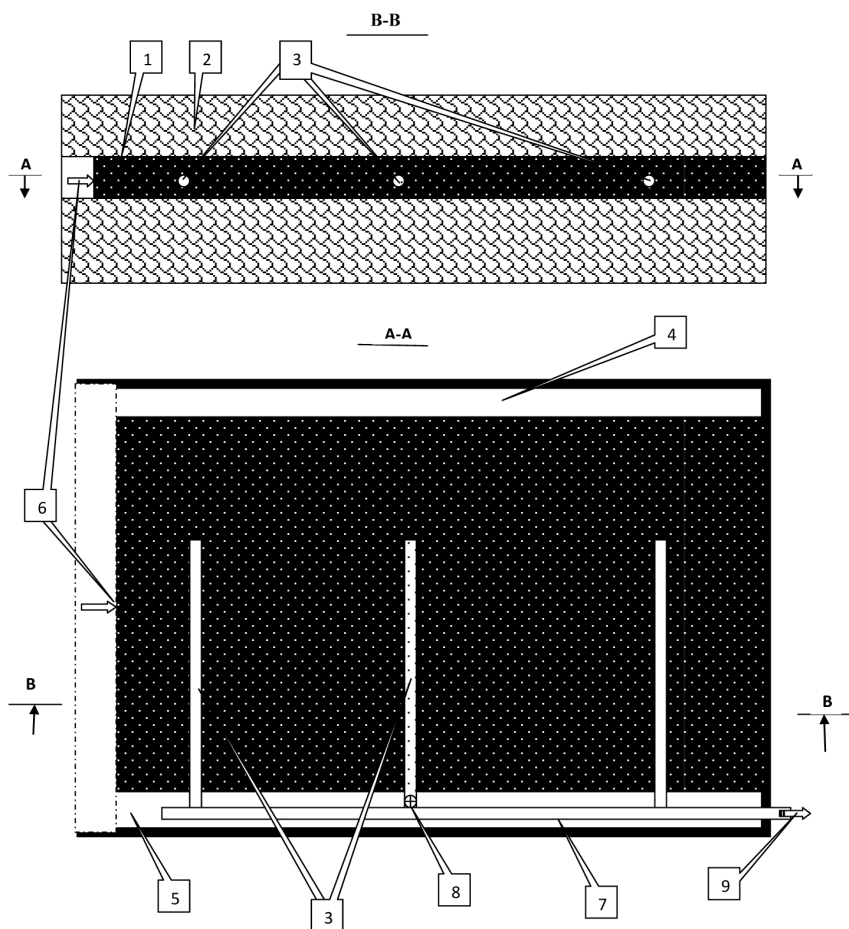


Рис. 1. Схема пластовой дегазации выемочного столба: 1 – угольный пласт; 2 – вмещающие породы; 3 – дегазационные скважины; 4, 5 – вентиляционный и откаточный штреки; 6 – направление движения лавы; 7 – магистральный газопровод; 8 – аппаратура для измерения пластового давления; 9 – направление газоотсоса

Показатели дегазации выемочного столба можно прогнозировать на базе компьютерного моделирования, используя совместные решения системы фундаментальных уравнений фильтрации и геомеханики. Раздельные физико-математические модели процесса массопереноса метана и геомеханики в угольных пластах хорошо известны и результаты моделирования частных задач описаны в работе [3].

Для учета фактора влияния горного давления на проницаемость угля и вмещающих пород воспользуемся

формулой, описанной в работе [4], связывающей проницаемость и среднее горное давление:

$$C = 1,013 \cdot 10^{-\beta \cdot \sigma}, \quad (1)$$

где C – проницаемость в мД; β – эмпирический коэффициент, частности $\beta = 0,31 \cdot 10^{-6}$ Па; σ – среднее нормальное напряжение, Па;

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}.$$

Из формулы (1) следует вывод об уменьшении проницаемости в 10 раз

при повышении среднего сжимающего напряжения от атмосферного до 3 МПа. Противоположный механизм повышения проницаемости происходит при геомеханической разгрузке, когда величина среднего давления понижается.

Если исследователю по данным экспериментов известно значение проницаемости C_0 при среднем напряжении σ_0 , то проницаемость C при произвольном среднем напряжении σ составит (в системе СИ):

$$C = C_0 \cdot 10^{0,1 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_0 - \sigma)}, \quad (2)$$

где σ_0 – среднее напряжение в массиве, при котором известно значение проницаемости C_0 .

Используя формулу (2) следует иметь в виду, что конкретно понимается под средним напряжением σ_0 . Так, например, если известно значение проницаемости C_0 , определенное в лабораторных условиях, то начальную величину среднего напряжения следует принимать равной атмосферному давлению. С другой стороны, если и имеется информация о проницаемости C_0 в натурном объекте (угольный пласт), то для учета изменения проницаемости C в зависимости от напряженного состояния σ надо в качестве отправной точки использовать известное значение среднего напряжения σ_0 в массиве.

Формула (2) не учитывает деформационные свойства породы. Однако в действительности следует признать, что чем больше модуль Юнга, тем меньшей мере будет проявляться фактор горного давления, поскольку при высоком модуле Юнга деформации минимальны. Поэтому более правомерно при учете напряженного состояния использовать корректирующий коэффициент в виде отношения модулей Юнга, с учетом которого уравнение (2) переписывается в виде

$$C = C_0 \cdot 10^{0,31 \cdot 10^{-6} \cdot (\sigma_0 - \sigma) \cdot \frac{E}{E_0}}, \quad (3)$$

где E , E_0 – модули Юнга сравниваемых пород, Па.

Начальные компоненты нормальных напряжений на глубине в пласте определить невозможно, поскольку они не могут быть измерены с земной поверхности. Поэтому, при отсутствии иных данных, воспользуемся связью между вертикальными и горизонтальными напряжениями, выраженными с учетом бокового распора при известном значении коэффициента Пуассона ν

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_z. \quad (4)$$

Таким образом, если по результатам испытаний пласта известно значение проницаемости C_0 в месте залегания (неразгруженный от горного давления пласт), то под средним начальным напряжением σ_0 следует понимать следующую величину напряжения

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \left(\rho gh + 2\rho gh \frac{\nu}{1 - \nu} \right) = \frac{\rho gh}{3} \cdot \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \quad (5)$$

Если реализовано напряженное состояние в условиях плоской деформации, то имеем другую зависимость с поправкой, учитывающей коэффициент Пуассона

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \left(\rho gh + \rho gh \frac{\nu}{1 - \nu} \right) = \frac{\rho gh}{3} \cdot \frac{1}{1 - \nu}. \quad (6)$$

Таким образом, расчетными формулами (1)–(6) описана математическая связь, позволяющая решить комбинированную задачу в виде системы дифференциальных уравнений механики горных пород, и уравнений массопереноса.

Предварительно собрана доступная информация по исследуемому угольному пласту, представленная в таблице.

Исходные данные

Модуль деформации угля, Па	$5 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона угля	0,35
Модуль деформации кровли, Па	$3 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона кровли	0,3
Модуль деформации почвы, Па	$2 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона почвы	0,32
Вертикальное горное давление, Па	$5 \cdot 10^6$
Коэффициент сжимаемости зерна, 1/Па	$1,067 \cdot 10^{-10}$
Предельная сжимаемость угля	0,01
Эффективная пористость угля	0,03
Эффективная пористость кровли	0,02
Эффективная пористость почвы	0,02
Проницаемость кровли, м ²	$0,15 \cdot 10^{-15}$
Проницаемость почвы, м ²	$0,15 \cdot 10^{-15}$
Динамическая вязкость газа, Па·с	$1,08 \cdot 10^{-5}$
Длина скважины, м	120
Газовая постоянная, Дж/(моль·К)	8,31
Температура газа, К	300
Молекулярная масса, кг/моль	$16 \cdot 10^{-3}$
Мощность пласта, м	2,0
Диаметр дегазационных скважин, м	0,076
Расстояние между скважинами, м	15

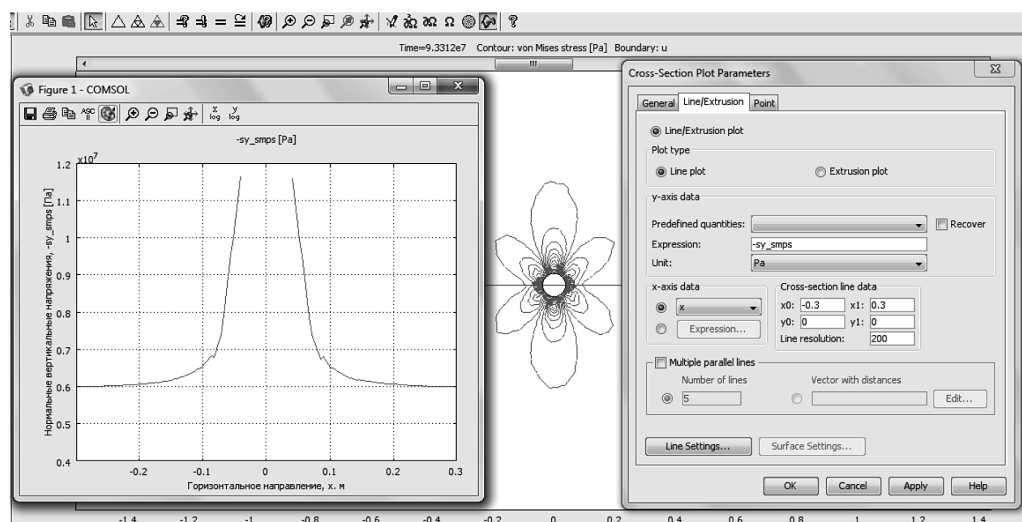


Рис. 2. Распределение напряжений вокруг скважины

Граничные параметры объекта моделирования:

- вертикальные напряжения горного давления сжимают выделенный массив;
- в горизонтальном направлении на модель также действуют сжимающие напряжения;
- основание модели учитывает способность к перемещениям в горизонтальном направлении.

На рис. 2 представлено распределение напряжений вокруг скважины и изолинии напряжений Мизеса. Изменение напряженного состояние вокруг скважины распространяется на расстояние не более диаметра скважины. С технологической точки зрения важно не допустить, чтобы возникшее напряженное состояние не понижало проницаемость угля в ближней зоне вокруг скважины.

На рис. 3 представлено распределение нормальных напряжений. Изменение напряжений относительно первоначального состояния ощущается на расстоянии до двух диаметров скважины. Следовательно, уголь на расстоянии более 0,5 м от оси скважины находится в неразгруженном состоянии и его проницаемость в процессе геомеханической разгрузки вокруг скважины практически не изменяется.

На рис. 3 показано распределение осевых нормальных напряжений в горизонтальном направлении. На свободной поверхности напряжения равны нулю, на некотором удалении от поверхности достигают максимума

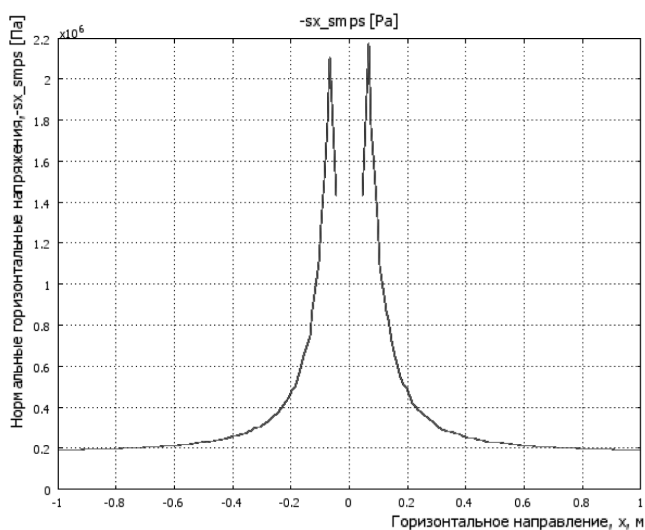


Рис. 3. Распределение нормальных горизонтальных напряжений

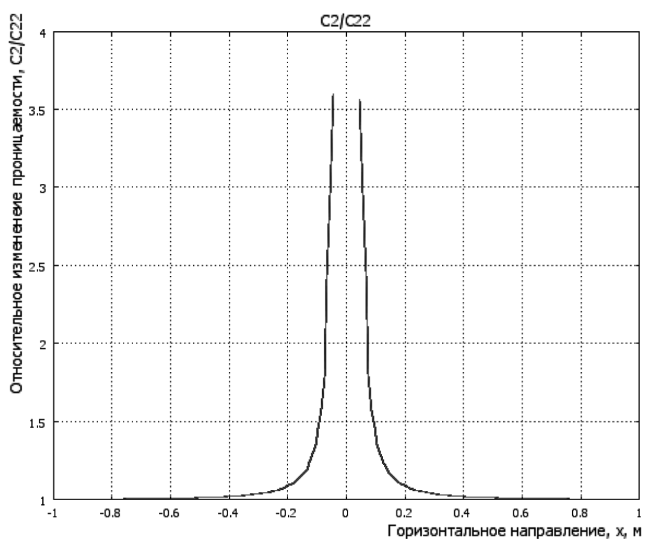


Рис. 4. Изменение проницаемости угля вокруг скважины

и затем переходят в начальные напряжения, характерные для неразгруженного массива.

На рис. 4 показана зависимость проницаемости, рассчитанная по формуле (3), в зависимости от расстояния от оси скважины. Разгрузка от начального горного давления приводит к увеличению проницаемости с

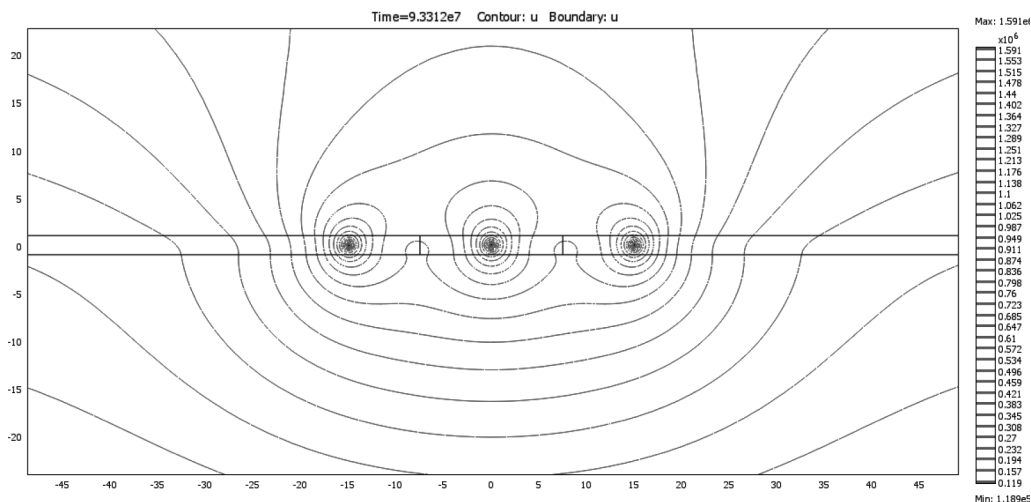


Рис. 5. Изолинии давления в угольном пласте

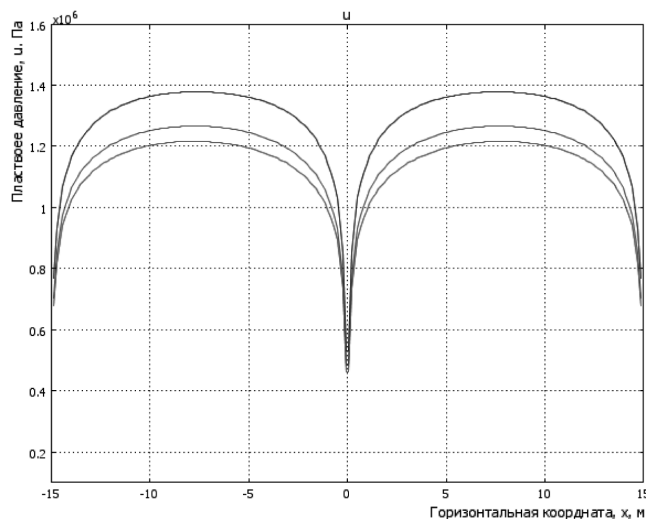


Рис. 6. Распределение пластового давления через 1, 2, 3 года

максимумом в 3,5 раза. Как и ожидалось по рисункам 1 и 2 эффект увеличения проницаемости проявляется на расстоянии до 0,5 м от оси скважины.

На рис. 5 показаны изолинии пластового давления через три года дегазации. При заданных в расчетах исходных параметрах можно утверждать, что пластовое давление метана понижается. Численные значения пластового давления в пространстве между скважинами графически пред-

ставлено на рис. 6 в моменты времени через 1, 2, 3 года, соответственно.

Дебит метана и из дегазационных скважин рассчитывается по формуле

$$Q = -2\pi r_0 L \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{C(r)}{\mu} P(r) \right] \quad (\text{при } r = r_0) \quad (7)$$

где L – длина скважины, м; r_0 – радиус скважины, м; μ – динамическая вязкость метана, Па·с; $C(r)$ – проницаемость с учетом горного давления, м²; $P(r)$ – пластовое давление, Па.

На рис. 7 представлено изменение дебита метана в течение времени. В начале дегазации дебит имеет максимальное значение, достигающее 23 л/мин. С течением времени дебит понижается и через 3 года его величина составляет 15 л/мин.

Наконец, еще одним важным информативным показателем является изменение газосодержания пласта в течение времени дегазации. Запишем интегрируемое выражение

$$\Delta G = \left(\frac{abP_0}{1+bP_0} - \frac{abP(r,t)}{1+bP(r,t)} \right) \cdot \frac{1}{0,67 \cdot 1,3} \quad (8)$$

где a, b – константы Ленгмюра; P_0 – начальное пластовое давление, Па; $P(r, t)$ – текущее пластовое давление в зоне дегазации во времени; $0,67$ – объемная масса метана в нормальных условиях, $\text{м}^3/\text{т}$; $1,3$ – объемная масса угля, $\text{т}/\text{м}^3$.

Интегрированная величина, отнесенная к объему интегрирования, описывает параметр дегазации в виде нормального объема метана, вышедшего из угля, находящегося в пространстве между скважинами

$$\frac{\sum \Delta G \cdot \Delta V}{2 \cdot 15} \quad (9)$$

где ΔV – объем, в котором изменилась газонасыщенность на величину ΔG ; 2 – мощность пласта, м; 15 – длина зоны дегазации, м.

Съем метана между дегазационными скважинами, рассчитанный по формуле (9) представлен на рис. 8. Прогнозируем, что за три года дегазации газонасыщенность угольного пласта понизится на $2,4 \text{ м}^3/\text{т}$. Такого типа прогнозы представляют большой практический интерес.

Выполненные расчеты представляют практический интерес при решении технологических задач, направленных на повышение эффективности дегазации угольных пластов. В представленном графике на рис. 6 дебит метана соответствует фактическим значениям, замеренным по раз-

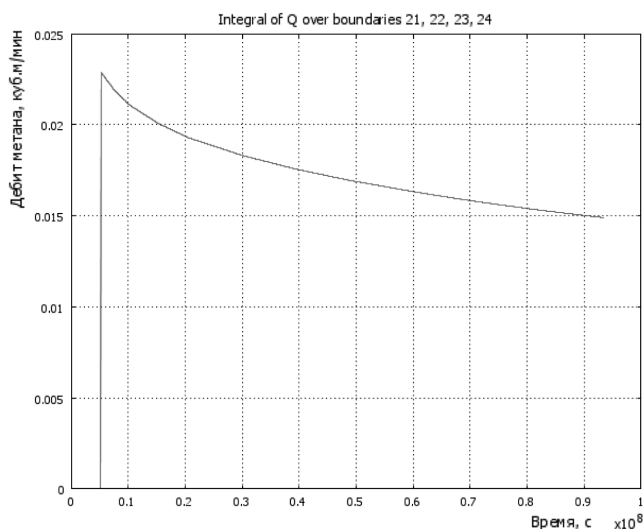


Рис. 7. Дебит метана в течение времени

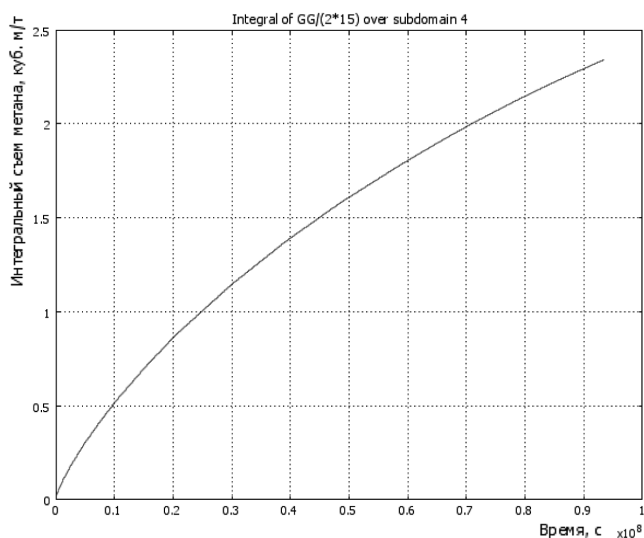


Рис. 8. Съем метана между дегазационными скважинами

личным выемочным столбам на шахте им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс». Очевидная технологическая рекомендация направлена на изыскание новых способов повышения эффективности дегазации, что представляет большой практический интерес для обеспечения безопасности по фактору угольного метана.

1. Сластунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В. Обоснованный выбор технологических схем управления газовыделением на выемочном участке при заблаговременной дегазационной подготовке угольных пластов к безопасной и эффективной разработке / Сборник научных трудов «Современные проблемы шахтного метана» (к 85-летию проф. Н.В. Ножкина). – М.: ИД ООО Роликс, 2014. – С. 38–48.

2. Сластунов С.В., Ермак Г.П., Ютяев Е.П. Дегазационная подготовка угольных пластов к интенсивной отработке как основа систем-

ного решения проблемы метанобезопасности угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВІ. Труды международного научного симпозиума «Неделя Горняка-2014». – 2014. – С. 107–119.

3. Каркашадзе Г.Г. Моделирование физических процессов горного производства. – М.: МГУ, 2013. – 98 с.

4. Somerton W.H., Soylemezoglu I.M., Dudley R.C. Effect of Stress on the Permeability of Coal // Intl. J. Rock Mechanics Mineral Science and Geomechanics Abstracts (1975) 12, pp. 129–45. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Каркашадзе Георгий Григорович – доктор технических наук, профессор, e-mail: g-karkashadze@mail.ru,

Хаутиев Адам Магомет-Баширович – аспирант, e-mail: adamas-06@mail.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC 622.411.33:622.831

MODELING COAL BED DEGAISING WITH WELLS CONSIDERING GEOMECHANICAL STRESSES

Karkashadze G.G., Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: g-karkashadze@mail.ru, Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, Hautiev A.M.B., Graduate Student, e-mail: adamas-06@mail.ru, Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia.

Presents research process coal seam degasification through wells drilled from underground mine workings. The analytical model includes a system of differential equations describing the mass transfer of methane in the coal seam and the host rocks on the basis of the Darcy law and the Langmuir equation. Geomechanical model takes into account the stress-strain state of a coal and rock mass to match the diameter of the wells and under the action of rock pressure. The relationship between the permeability of a coal seam and medium mechanical stresses set of experimental exponential dependence. Performed computer modeling of the process of degassing means "COMSOL Multiphysics". Presents graphs showing the stress state around the degasification wells, the distribution of the total gas pressure in the coal seam and the flow rate of methane in the course of time. It is established that the factor of stress concentration around the borehole leads to increased permeability and increased inflows of methane, which is of practical interest when solving problems intensify coal seam degasification. Computer simulation results correspond to measurements of the actual flow rate of methane in the mine conditions.

Key words: coal, methane, equations of gas transfer, geomechanics, modeling, degassing, rock pressure, permeability, flow rate of methane.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the RF Ministry of Education and Science, Grant No. 15.575.21 0015.

REFERENCES

1. Slastunov S.V., Yutyaev E.P., Mazanik E.V. *Sbornik nauchnykh trudov «Sovremennye problemy shakhtnogo metana» (k 85-letiyu prof. N.V. Nozhkina)* (Contemporary problems of mine methane. Collected scientific papers (to Professor N.V. Nozhkin's 85th Anniversary)), Moscow, ID ООО Roliks, 2014, pp. 38–48.
2. Slastunov S.V., Ermak G.P., Yutyaev E.P. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, special issue 1. Miner's Week–2014 International Symposium Proceedings. 2014, pp. 107–119.
3. Karkashadze G.G. *Modelirovanie fizicheskikh protsessov gornogo proizvodstva* (Modeling physical processes in mines), Moscow, MGGU, 2013. 98 p.
4. Somerton W.H., Soylemezoglu I.M., Dudley R.C. Effect of Stress on the Permeability of Coal Intl. J. Rock Mechanics Mineral Science and Geomechanics Abstracts (1975) 12, pp. 129–45.